総 説

中性子測定における標準化の現状†

中沢正治

東京大学工学部原子力工学研究施設

319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

Key Words: neutron dosimetry, standardization, nuclear reactor, accelerator, health physics, activation method, unfolding

1. はじめに

1.1 対象とする中性子場および測定方法

中性子場の利用方法とその成果は¹⁾、応用分野ごとに大変異なるが、実際に利用可能な中性子場とか、測定方法自身はほとんどの場合共通的なものである。この意味で、実際に測定対象とする中性子場を、中性子エネルギーの範囲と中性子束の大きさにより区分して表示したのが図1である。また、同図に代表的な中性子測定器の適用範囲例を重ね合わせて表示した。

この図を見ると、測定対象および測定方法について、大きく3つに区分して考えられることが分かる。

つまり

① 原子炉レベル（高レベル）中性子場

おおよそ $10^8 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 程度以上の中性子束レベルで、ほとんどの場合原子炉を用いて構成されている。また測定手法は放射化法が代表的である。

② 加速器レベル（中レベル）中性子場

おおよそ $1 - 10^8 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 程度の中性子束レベルで、加速器によって発生した中性子とか、原子炉の実験孔から引き出したビーム状の中性子などであり、断面積測定、炉物理、炉工学、遮蔽等の中性子工学研究に用いられている。測定方法は、各種の中性子スペクトロメータが適用でき、詳細な測定が可能である。

③ 保健物理レベル（低レベル）中性子場

約 $1 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 程度以下の中性子束レベルで、原子炉、加速器、さらには核燃料物質取扱い工程などでの放射線遮蔽体を貫通してくる低レベルの中性子場であ

(Si)はSiの吸収線量を示す。

図1 代表的な中性子場の例と測定法の関係
(1 krad=10Gy, 1 rem=10mSv)

り、保健物理的観点からの測定対象である。測定方法は、減速材付検出器法とか、この特殊ケースとしてのレムカウンタなどにより行う。

なお、以上の区分には、中-高レベルで行われる医療用照射の観点が含まれていない。この場合の線量測定法は組織等価電離箱等が使用されるが、この分野の解説は別報に期待したい。

1.2 宇宙線中性子の存在について²⁾

この地球上にはバックグラウンドとしての中性子が存在し、 γ 線の線量の約1/10ぐらゐ、つまり 2.5 nSv/h

† Status Review on Neutron Dosimetry Standardization. Masaharu NAKAZAWA: Nuclear Engineering Research Laboratory, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 2-22, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki Pref. 319-11.

($0.25\mu\text{rem/h}$) 程度ある。

この中性子は、宇宙線（ほとんどが高エネルギー陽子線）が、地球上の大気、土、水などの原子核と反応し、スター反応などにより発生させられたものであり、宇宙線中性子といっても、宇宙線により地球領域内で作られた二次的中性子の意味である。宇宙線強度が強い上空ほど発生中性子量は多いが、この地球面上では、60 kg の水により毎秒1個の中性子発生量である。これは、重さが同じであれば空気でも土でもあまり変わらない。したがって、体重60 kg の人は、1 n/s の中性子発生源になっていると考えればよい。

これらの発生中性子が作る地球上での中性子場は、日本のあたりの海面レベルで $0.008\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ (線量当量にすると 2.5 nSv/h ($0.25\mu\text{rem/h}$)) である。これは、手のひらを拡げると、そこを毎秒1個の中性子が通過していることとだいたい同じである。また、上空へ行

けばこの中性子束は増加し、ジャンボ機の飛ぶ高度1万m辺りでは、約100倍にも増えるとのことである。

1.3 中性子測定標準化とは？

長さを測る場合であれば、「メートル原器」に相当する物があり、つぎに「物指し」用とか、「マイクロメータ」用の「二次標準」がこれらの製品メーカにあって校正後売り出されている。そしてわれわれは、物指しやマイクロメータを用いて、所定の単位と精度で安心して長さ測定を行えるという仕組みになっている。

中性子測定における「メートル原器」は、各国ごとに作られており、日本では筑波にある電子技術総合研究所が所有している。これは、「中性子標準」と呼ばれており、その具体的内容を表1に示した³⁾。また、この中性子場は図1の中にも描かれており、「放射性同位元素(RI)中性子源、加速器による標準中性子場」、

表1 電総研における中性子標準の現状

対称となる標準量	線	源	測定方法および基準測定装置	範囲と精度	備 考
熱中性子束密度 ($\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$)	黒鉛パイルと $\left\{ \begin{array}{l} \text{Ra}(\alpha)\text{-Be 中性子源} \\ 1\text{ Ci または } \text{T}(d, n) \\ \text{反応による中性子源} \end{array} \right.$ の組合わせ		Au はくの誘導放射能を $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数装置により絶対測定	$10^3 - 10^7\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ $\pm 1.5\%$	1967年国際比較
中性子放出率 (n/s)	Ra(α)-Be Ra(α)-Be Ra(γ)-Be Am-Be ^{252}Cf	1 Ci 100 mCi 200 mCi 4 Ci 5.4 mCi	水槽法 マンガンバス法 バスモニタの校正は $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 同時計数装置による	$10^5 - 10^7\text{ n/s}$ $\pm 2.5\%$	1964年国際比較 1次標準 以下2次標準 1980年国際比較 予定
単色速中性子束密度 ($\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$)	Li(p, n) 反応 T(p, n) 反応 D(d, n) 反応 D(d, n) 反応		$\left\{ \begin{array}{l} \text{メタン比例計数管} \\ \text{反跳陽子半導体検出器} \\ \text{随伴粒子法} \end{array} \right.$	100 - 250 keV $10^3 - 10^5\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 500 keV - 1.2 MeV $10^3 - 10^5\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 2.5 - 5.0 MeV $10^3 - 10^5\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 14.5 - 15.0 MeV $10^3 - 10^5\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$	1975年国際比較 250 keV 565 keV 2.5 MeV 14.8 MeV
連続速中性子束密度 ($\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$)	核分裂スペクトル (^{252}Cf , 濃縮ウラン) 水中中性子スペクトル (中性子源と水の組合わせ)	NE 213 サンドウィッチカウンタ (^3He , ^6Li)		$\sim 10^5\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$	研究中

(1 Ci = 37 GBq)

「標準熱中性子場」と表示してある。

これに対し、「二次標準」というのは原子炉級の高レベル中性子場とか、保健物理用の低レベル中性子場の標準のことで、各中性子測定器が適切にこのような「二次標準」で校正できるように準備しておくこと、これが中性子測定の標準化の一つの条件である。もちろん、各測定器については性能、使用方法が明示される必要がある。

このような標準化を進めるさいに、中性子特有の問題がある。それは、中性子の取り得るエネルギー範囲が図1からも分かるように大変広いことである。しかも、この中性子のエネルギー分布（スペクトル）が一定ではなく、各物質の中性子核断面積の性質、体系内の場所により変るため、常にこのスペクトル形状を念頭に置いて測定し、かつ補正する必要がある。つまり単純に「長さ」のようなスカラー量ではなく、エネルギー分布を持つ中性子束というベクトル量の測定および校正方法を考えなければならない点が、中性子標準化に特有の困難点である。しかも、このようなエネルギー分布を正確に測定する簡便な測定器がないので、大変不十分な条件のまま標準化の努力をせざるを得ないのである。

以下に、中性子測定の標準化に関する具体的内容、つまり測定手法および二次標準が確立されているかどうか、実際の測定精度は現在どの程度であるのか等について、高、中、低の各レベルごとに説明していく。

2. 原子炉級中性子場

日本原子力研究所における多くの研究用原子炉とか東大「弥生」炉、京大炉などを用いた各種の中性子照射実験、材料試験用原子炉（JMTR）とか動力炉核燃料開発事業団の高速実験炉「常陽」を用いた燃料、材料照射実験、さらには、実際の軽水型発電炉における压力容器照射脆化監視試験のための線量測定などが、原子炉を対象とした $10^8 - 10^{15} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ もの高レベル中性子場の具体例である。この場合、主として放射化法による測定が行われる。

2.1 放射化反応率の測定法の確立とその精度

代表的な放射化検出器がどのようなエネルギー領域に感度を有し、その半減期がどれだけであるかは文献⁴⁾にまとめられている。なお、半減期に比べ数倍以上の照射時間が可能であれば放射化量は飽和し、その場の中性子束値 $(\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}))$ に比例した量となる。逆に、半減期より十分短い照射時間のときの放射化量は

表2 放射化法による原子炉中性子ドシメトリの作業手順

中性子フルエンス (n/cm^2) に比例した量になるので、目的に応じ適当な半減期のものを選択する。

実際の測定手順は表2のとおりであり、多くの定数を用い、各種の補正を行って最終結果を求める⁴⁾。なお、同表で unfolding と書かれた部分については後述する。この測定手順については、ASTM-規格集 (Part 45)⁵⁾ によくまとめられているし、国内でも検討されているのでミスをしないうり問題はない。

この放射化反応率の測定精度はよく調べられており、国内外で多くの相互比較研究⁶⁻⁸⁾、不確定性解析研究⁹⁾が進められ、現在 $\pm 2 - \pm 4\%$ というのが結論である。表3に、東大「弥生」炉を用いて、国内主要機関で行った相互比較の結果を示した⁹⁾。なお、一番右の欄は考えられる誤差原因を加え合せたもので、これがその左の欄の「グループ間のばらつき」と同程度であることは、この相互比較の整合性を示している。

2.2 標準中性子場

ほとんどの研究用原子炉では、その内部に実用的な意味で、中性子束の基準点のような部分があり、他の照射場所は基準点に比べ何分の1とか何倍になっているとか称せられる。この相対比というのは、簡単に精

表3 放射化反応率の測定に関する相互比較結果
(東大「弥生炉」で独立に照射し評価した結果)

放射化反応	参加グループ				4グループ 平均の放射 化反応率	4グループ 間のばらつ き(%)	測定手順よ り評価した 誤差(%)
	YAYOI	JMTR	KUR	PNC			
$^{59}\text{Co}(n, \alpha)^{56}\text{Mn}$	1.47 - 17	—	1.50 - 17	1.40 - 17	1.46 - 17	3.5	2.4
$^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$	8.48 - 16	8.24 - 16	—	8.12 - 16	8.28 - 16	2.2	2.8
$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	1.00 - 16	1.04 - 16	1.05 - 16	1.06 - 16	1.04 - 16	2.5	2.8
$^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$	3.87 - 16	—	3.83 - 16	—	3.85 - 16	0.7	8.4
$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	6.74 - 17	6.91 - 17	6.76 - 17	6.64 - 17	6.76 - 17	1.6	2.9
$^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$	1.47 - 16	1.40 - 16	1.42 - 16	1.48 - 16	1.44 - 16	2.7	3.1
$^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$	—	1.33 - 15	1.14 - 15	—	1.24 - 15	9.7*	—
$^{47}\text{Ti}(n, p)^{47}\text{Sc}$	1.68 - 15	2.72 - 15	1.98 - 15	—	2.12 - 15	25.3*	11.5
$^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$	2.57 - 17	3.08 - 17	2.69 - 17	—	2.78 - 17	9.6*	3.8
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	1.07 - 14	1.01 - 14	1.07 - 14	1.01 - 14	1.04 - 14	3.4	2.4
$^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$	2.12 - 14	2.14 - 14	2.03 - 14	2.05 - 14	2.09 - 14	2.6	3.9
$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	2.82 - 14	2.74 - 14	—	2.84 - 14	2.80 - 14	1.5	3.8

* 再検討中

度よく求められるものである。したがって、この基準点の中性子束値を精度よく知ることができることが大変望ましい。このように、その場所の中性子束値がよく分かっており、そのエネルギー分布もよく評価されており、校正等に使用できる場所を基準（ベンチマーク）中性子場、または標準（スタンダード）中性子場⁹⁾という。IAEA ではこのような標準中性子場の国際的リスト作りを行っており、日本では東大の「弥生」炉とか京大炉重水熱中性子標準場などが登録されている¹⁰⁾。

この標準中性子場は、電子技術総合研究所にある一次標準（国家標準）に対し、二次標準の役割を果たすべきものであるが、中性子束レベルとかエネルギー分布が両者の間ではかなり異なっている。したがって、両者を共通の測定器で測り、「二次標準」を「一次標準」で校正するというのは、熱中性子領域を除き、大変困難である。つまり、現状の多くの中・高速標準中性子場は一次標準に対し校正されていない（トレーサビリティを有していない）ので、この点の改善が必要である。

2・3 中性子束の評価精度

原子炉を用いた材料の照射損傷に関する研究分野では、照射中中性子量を1 MeV あるいは0.1 MeV 以上の中性子フルエンスとか、各材料中での原子はじき出し数 dpa (displacement per atom) の量で表す。このような量の測定精度を明確に表現することは、この炉内線

量測定分野において現在、最大の研究テーマとなっている。とくに、後述する unfolding 法とも関連しているので明確にはいえないが、だいたい5-20%の間にあると考えられている。

なお、このような測定精度は、表現しようとする量と用いた放射化検出器の感度曲線がよく似ているかどうかによっても多いに影響されるので注意が必要である。また、適切な「標準中性子場」で校正されているかどうかによっても、最終誤差は大幅に変化するが、現在、この「標準中性子」場自身の誤差がどれほどであるのかさえ、明確に表現できていないので、今後の課題である。

3. 加速器、原子炉ビーム等の中レベル中性子場

国家標準自身が加速器により発生した単色中性子自身を含んでいることから分かるとおり、このレベルの中性子場は核物理、原子炉物理、中性子工学などの諸分野の基礎となっており、したがって、多くの研究の蓄積がある。測定方法についても、各種の中性子スペクトロメータが適用可能である。

3・1 高速中性子スペクトロメトリ

図1の各種中性子スペクトロメータの適用例としては反跳陽子比例計数管、 ^3He 比例計数管、NE213有機液体シンチレータ、さらには反跳陽子カウンタレスコープなどがあげられる。

図2 弥生炉ファーストカラムビーム中性子のスペクトル測定結果

このような測定器の使用方法などは、未だ多くの文献に入っているのみで統一的に整理されてはいないので、専門家以外の人々が自由に使えるような状態にはなっていない。この場合も、放射化法と同様に、測定されたデータから unfolding という計算機処理をする必要がある。

しかしながら達成されている技術レベルはかなりの精度になっており、東大の弥生炉の fast column ビーム中性子場を用いて実施された国内機関の間での相互比較結果を図2に示した¹¹⁾。このような微分的なスペクトルが5%程度以内で一致しているというすばらしい結果である。

3.2 14 MeV 中性子場の測定

最近、核融合炉 中性子工学研究の一環として、14 MeV 中性子を用いた核融合炉 ブランケット 模擬実験が実施されている。この研究の一つの目的は、適切なリチウム体系内に 14 MeV 中性子が1個入ったとき、その体系内でトリチウムが何個できるか、つまりトリチウム生成率を調べることにある。これは実際の核融合炉において、トリチウム燃料の収支バランスが保てるかどうかに関連するきわめて重要な問題である。この実験では、14 MeV 中性子数を厳密に高精度で測る必要のあることは明白である。また、これ以外にも、核融合炉用の材料開発研究のため 14 MeV の強力中性子源で照射実験が行われることも多くなっており、そのための 14 MeV 中性子照射量の測定が必要になっている。

この 14 MeV 中性子に対し、適用される各種測定法

図3 中性子束レベルと測定手法の関係図

を図3に示した。この図より、国家標準を用いて他の中性子発生装置を校正するためには、どのような測定器を用いる必要があるかが理解されよう。なお、この校正において注意すべきことは、14 MeV 中性子といっても、DT 核反応における中性子の放出角度により発生中性子エネルギーは 13-16 MeV までエネルギー的なばらつきを有するので、これを無視して 14 MeV 中性子量を測ると±10%程度、またはそれ以上の誤差を生じてしまうことである。この場合、最近よく用いられる方法は、エネルギー感度曲線の傾きが異なる2つの測定器の計数率比を用いて、実効的な中性子エネルギーを決める方法である。図4に、その例として $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89\text{m}}\text{Zr}$ と $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$ の放射化反応の比を示した。 $^{89\text{m}}\text{Zr}$ と $^{92\text{m}}\text{Nb}$ の半減期、放出γ線が類似しているので、この比はかなりの精度で決めることができ、したがって、中性子エネルギーも±100 keV 程度の誤差内で決めることができる¹²⁾。

3.3 標準化のための研究の必要性

この分野の測定器については、技術的には高いレベルにあるものの、標準化の観点からは大変不十分な状況にあることは前述した。たとえば NE 213 有機液体シンチレータとか ^3He 比例計数管などは、γ線測定

NBS: National Bureau of Standards
 ETL: Electro-Technical Laboratory
 IRK: Austria, Vienna
 図4 Zr/Nb 反応率比法の校正曲線

における NaI(Tl) シンチレータ程度の性能を有しているものと考えられるが、適切なマニュアル、データ解析法が不足している。

中性子測定がどの程度の範囲に拡がるのかに依存するが、もし今後、より強力に標準化を進めるとした場合、まず第一に着手すべき分野が、これらの標準検出器の確立であることを強調したい。

4. 保健物理的中性子場

原子炉の生体遮蔽体通過後とか、加速器の遮蔽壁外部、核燃料取扱い施設等における管理区域内、さらにはスカイシャイン中性子場など、保健物理、放射線防護の観点から測定対象となる中性子場で、 $100 \mu\text{Sv/h}$ (10mrem/h) とか $10 \mu\text{Sv/h}$ (1mrem/h) 程度以下を主対象としている。この分野では、一般に中性子スペクトロメータは NE 213 有機シンチレータを除き、感度不足のため実用的な測定はかなり困難である。代わりにポリエチレン減速材を BF_3 検出器、 ^3He 検出器、LiI シンチレータなどに被せた型の検出器（減速材付検出器）が多用される。

図5 減速材付中性子線量計の構成例

4.1 減速材付検出器の構成例

代表的な減速材付検出器の構成例を図5に示した¹³⁾。形状も球型、円筒型があり、ポリエチレン内に吸収材を入れてエネルギー依存感度曲線を rem 換算曲線にできるだけ近づけたもの (Anderson-Braun 型) はレムカウンタとも呼ばれる。

4.2 ボナー球 (円筒) によるスペクトル測定

LiI 検出器に被せるポリエチレン球の厚さを変えると、エネルギー感度曲線が変わるのでこの測定データを unfolding (後述) して、中性子スペクトルの概形を求めることができる。これを考案者の名前をとって、ボナー球型検出器という¹⁴⁾。

ポリエチレン球を作るのは面倒なので、これを円筒形にし、内部に円筒形の BF₃ 計数管などを入れたものを、筆者らは円筒型ボナー検出器と呼称している。この円筒型ボナー検出器のポリエチレン肉厚を変化させたときの計数値が典型的な中性子場で、どのエネルギー領域の中性子に感じているのかを図6に示す。高エネルギー中性子成分が多いと、厚いポリエチレン円筒のときの計数値が相対的に増えることが分かる。

4.3 レムカウンタによる線量測定

中性子の線量当量 rem 値を直読できるように工夫

図6 円筒形ボナー検出器の有感領域。図中の数字はポリエチレン円筒の厚さを示す。

図7 レムカウンタ効率曲線

図8 Studsvik レムカウンタ入射角度依存性

されたレムカウンタは、保健物理的測定で重要な役割を果たしている。その代表例は“Studsvik 2202D”と呼ばれるレムカウンタで、国内でかなり使用されている。

この Studsvik レムカウンタについて、標準化のための研究が進められているので紹介する¹⁵⁾。図7は現在までに評価されている効率曲線の実測値と、rem 値を算出するために必要な効率曲線を記したものである¹³⁾。この曲線は1-2 MeV 領域で重ねられているが、この場合、10 keV 中性子に対し約3倍過大評価、熱中性子および14 MeV 中性子に対し約1/2倍の過小評価となる。したがって、このレムカウンタの効率曲線のずれを補正するためには、対象とする中性子場のエネルギー分布のデータが必要となる。これは、前述のボナー型検出器で測ることになる。

また、この Studsvik レムカウンタに中性子が入射する角度とか入射ビーム径を変えた場合の効率の変化を図8に示した¹⁶⁾。前方から真横(90°)の入射面に、一様に中性子があたっている場合は問題はないが、ビーム径が10 cmφ程度にコリメートされているときとか、後方からの入射成分がある場合には、数十-50%ほど、過小評価する可能性があるので注意が必要である。

4・4 現状精度と標準化の必要性

たとえば、レムカウンタを ^{252}Cf 中性子源で校正し、実際の場の測定を行ったとき、測定対象についてのエネルギー分布とか、角度分布に関する情報がなければ、最高で係数2程度の不確定性を生ずる可能性がある。それに対し、たとえば自分の施設内の代表的中性子スペクトル場を「二次または三次標準」として設定し、そこで校正して使うということを行えば、10%程度の精度は実現できるものと考えられる。つまり、この保健物理的中性子場の精度は、現在のところ、新しい測定器の開発によってではなく、むしろ既存測定器を有効に使うための校正体系作り、つまり標準化によって向上、維持されるものと考えられる。

5. 中性子測定におけるデータ解析, Unfolding 法

中性子測定に用いられる放射化検出器、中性子スペクトロメータ、ボナー型検出器などの測定データを解析して、中性子束とかスペクトル、線量を評価する問題は、数学的にはまったく同一の問題でつぎのようになる⁴⁾。

$$A_i = \int R_i(E) \phi(E) dE = \sum_{g=1}^G R_{ig} \phi_g \quad (i=1, N) \quad (1)$$

ここで、 A_i は $i=1-N$ までの測定データ、 $R_i(E)$ は、各測定データに対応するエネルギー感度曲線、 $\phi(E)$ は中性子スペクトル関数である。数値計算上は、このエネルギー E を、差分化し $g=1, G$ 個の点で表す。これに対応して $R_i(E)$ 、 $\phi(E)$ も R_{ig} 、 ϕ_g ($g=1, G$) という有限ベクトル値に置き換えられる。一般に $G \gg N$ であるので、式(1)は、不定型（つまり可能解が多数存在する型）の線型連立方程式である。これを解いて、未知数である ϕ_g ($g=1, G$) を推測するとか、さらには $I = \sum_{g=1}^G W_g \phi_g$ と表されるような線量を評価すること、これが、いわゆる unfolding と呼ばれる問題の内容である。

5・1 不定型線形方程式の解法

多くの解法のレビューは別報を期待するとして、最近最もよく利用されているベイズ型の統計的推定法の概要を簡単な例題で説明する。例題は1つのデータから2個の未知数を求める問題で解法のあらすじは図9に示されている。つまり、未知数 f_1, f_2 について事前

図9 ベイズ型の統計的推測法を示す模式図

存在確率 $\pi_0(\mathbf{f})$ を与える（点線で描かれた円内がその確率を表している）。これらのうち、実験値は「 $\vec{R}$ 軸への射影成分が $P(A)$ という確率で与えられる領域に入る」ということを表す。したがって、 $\pi_0(\mathbf{f})$ と $P(A)$ の両方を満足する解として $\pi(\vec{\mathbf{f}})$ という確率分布で表される領域、つまり実線で描かれた楕円型の領域が解であるということになる。

この原理に基づいた大型計算機のコード、STAYSL¹⁷⁾、NEUPAC¹⁸⁾、FERRET¹⁹⁾などが開発準備されている。なお、上記のような確率分布の考えは使われないが、逐次近似型の SAND-II コードも、この unfolding 計算によく使用されている²⁰⁾。この場合、最終結果の精度は評価できないという欠点がある。

5・2 データ解析手法間の相互比較

この unfolding 法については、放射化法、スペクトロメータおよびボナー型検出器にすべて共通であるが、実際上は、まだ汎用プログラムとしては確立していない。たとえば、NE 213 スペクトロメータには FERDO とか FORIST という unfolding コードがよく使用されるが、その内部には経験的パラメータを含んでいる。

最もよく研究されているのは、放射化データを対象とする unfolding 法で、これについては入力データを共通にして結果を比較するという国際的な比較研究プロジェクトが IAEA により行われたので、その結果を紹介する²¹⁾。

用いられた入力データは米国オークリッジの原子炉 ORR での放射化データ21種および東大「弥生」炉のデータ12種（表3参照）であり、日米欧合わせて13機関19種の unfolding 計算結果が比較された。その結果

図10 放射化検出器データ解析法に関する IAEA の国際相互比較研究結果 (REAL-80)

を全部まとめて表示したのが図10である。

先に説明した統計的推測法は、同図中の濃い線のところに含まれており、その方法の妥当性が確認されたほか、経験的手法はときどきおかしな結果を与えることも図中より読み取れる。いずれにしろ、この結果は、放射化法による原子炉内中性子スペクトル測定について、現状を集大成して表現していると考えられる。現在は、これらの結果の誤差評価を厳密に行うことに力が注がれている。

6. ま と め

中性子測定の対象を、高、中、低の3レベルに分け、各分野における測定法、その精度、標準化の現状と今後の課題について説明してきた。測定手法の確立とマニュアル整備、「一次標準」により校正された使いやすい「2次、3次標準」の開発、整備と校正手法の確立、さらにはたとえば各測定器に対する精密級のランク付けなど、今後の課題は多いが、原子力工学研究全体の成熟とともに、着実に解決されていくことを期待する次第である。

文 献

- 1) Ed. by Schofield, P.: "The Neutron and Its Applications, 1982", Conference Series Number 64, The Inst. of Physics (1983)
- 2) 山下幹雄：理研シンポジウム講演集「環境中性子の諸問題」, p. 13 (1980)
- 3) 工藤勝久, 同上, p. 59 (1980)
- 4) 中沢正治, 関口 晃：日本原子力学会誌, **24**, 166 (1982)
- 5) ASTM-Standards Book, Part 45 (Nuclear Standards)
- 6) McErloy, W.N., et al.: *Nucl. Technol.*, **25**, 177 (1975)
- 7) 佐々木 誠, 鈴木惣十：動力炉技報, **38**, 72 (1981)
- 8) Nakazawa, M., et al.: UTNL-R-0099 (1981)
- 9) 木村逸郎, 神田啓治：日本原子力学会誌, **20**, 301 (1978)
- 10) IAEA, "Neutron Cross-sections for Reactor Dosimetry", IAEA-208, p. 89, Vienna (1978)
- 11) Sekiguchi, A., et al.: NUREG/CP-0004, **3**, 1223 (1977)
- 12) 中沢正治：核反応プラズマ実験における放射線 (科研成果報告書), p. 94 (1984)
- 13) 関口 晃：微弱線量中性子測定の標準化に関する研究 (科研成果報告書) (1981)
- 14) Bramblett, R.L., et al.: *Nucl. Instr. Meth.*, **9**, 1 (1960)
- 15) 小佐古敏荘, 他：日本原子力学会誌, **24**, 139 (1982)
- 16) 松本純平：東大・工修士論文 (1984)
- 17) Perey, F.G.: ORNL/TM-6062 (1977)
- 18) Nakazawa, M. and Sekiguchi, A.: NUREG/CP-0004, **3**, 1423 (1977)
- 19) Schmittroth, F.: HEDL-TME-79-40 (1979)
- 20) McErloy, W.N., et al.: AFWL-TR-67-41, **1** (1967)
- 21) Zijp, W.L., et al.: ECN-128 (1983)